

УДК 537.312.62

©1994

## ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА КРИТИЧЕСКИЙ ТОК И ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КЕРАМИК $Y_{1-x}Er_xBa_2Cu_3O_{7-y}$

*З. Дамм<sup>1</sup>, Т. С. Орлова, В. И. Смирнов, В. В. Шпейсман*

Экспериментально изучалось влияние механических напряжений на критический ток и вольт-амперные характеристики специально приготовленных однофазных и высокоплотных керамик  $Y_{1-x}Er_xBa_2Cu_3O_{7-y}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ). Установлено, что одноосное сжатие образцов приводит к увеличению критического тока  $I_c$  и уменьшению электрического сопротивления  $R$  образцов при  $I > I_c$ . При этом эффект нагрузки на значение  $\Delta I_c/I_c$  в магнитном поле несколько возрастает, а на значение  $\Delta R/R$  — сильно уменьшается. Предполагается, что наблюдаемые эффекты связаны с воздействием внешних напряжений на слабые связи (межзеренные границы), которые определяют  $I_c$  и вольт-амперные характеристики для изученных керамик.

Ранее в серии работ было установлено, что критический ток и вольт-амперные характеристики (ВАХ) высокотемпературных сверхпроводящих керамик при  $T < T_c$  ( $T_c$  — температура перехода) могут существенно изменяться под действием механических напряжений [1]. При этом исследования проводились на иттриевых (123) керамиках с различной структурой [2–4] и стехиометрией [5], а также на висмутовой керамике системы 2223 [6]. Рассматривалось и влияние магнитного поля на эффект механических напряжений [7]. Сами керамики получались спеканием по стандартной методике.

Указанный эффект механических напряжений на критический ток  $I_c$  и ВАХ до сих пор не находит достаточно полного объяснения, хотя обычно считается [1,8], что он связан с воздействием напряжений на слабые связи в виде межзеренных границ, которые к тому же могут содержать несверхпроводящие включения и диэлектрические прослойки.

В настоящей работе влияние напряжений на  $I_c$  и ВАХ изучалось на специально приготовленных однофазных с высокой плотностью образцах керамики  $Y_{1-x}Er_xBa_2Cu_3O_{7-y}$  с разными значениями  $x$  — от 0 до 1. В результате было установлено, что эффект механических напряжений (увеличение  $I_c$  и уменьшение электрического сопротивления  $R$  при  $I > I_c$ ) наблюдается на всех керамиках, несколько возрастая с увеличением  $x$ . При этом относительное изменение критического тока  $\Delta I_c/I_c$  под нагрузкой в магнитном поле несколько возрастает, а величина  $\Delta R/R$  сильно уменьшается.

<sup>1</sup> Институт низких температур и структурных исследований ПАН, Вроцлав, Польша.

## 1. Экспериментальная методика

Приготовление керамик  $(RE)Ba_2Cu_3O_7$  (фаза 123) производилось по специальной методике [9]. Они синтезировались при  $950^\circ C$  в две стадии из высокочистых реактивов  $Y_2O_3(Er_2O_3)$ ,  $BaCO_3$  и  $CuO$ . Используя соответствующие пропорции, на первой стадии получалась смесь  $(RE)Ba_2Cu_3O_7$  и  $BaCuO_2$  (продукт А). На второй стадии приготавливалась новая смесь (123) из продукта А,  $CuO$  и  $(RE)_2O_3$ , которая после прессования последовательно нагревалась в течение 4 h в кислороде при  $950^\circ C$ , медленно охлаждалась и выдерживалась в течение 5 h при  $400^\circ C$ , а затем медленно охлаждалась до комнатной температуры. В результате получались достаточно прочные керамики с высокой плотностью (около 90% от рассчитанной по рентгенографическим данным).

Рабочие образцы имели размеры  $2.5 \times 3 \times 6$  mm. Измерение электрических характеристик производилось при 77 К четырехзондовым методом. При этом токовые контакты (индий) наносились на торцы образца, а потенциальные располагались вдоль его оси [3]. Величина критического тока определялась по критерию  $1 \mu V/mm$ . Плотность критического тока у образцов  $70-90 A/cm^2$ , критическая температура  $T_{c0} = 91 \div 92$  К.

Нагружение образцов производилось сжатием вдоль наибольшего размера. Эксперимент по влиянию напряжений на ВАХ производился следующим образом. После определения величины  $I_c$  через токовые контакты образца, находящегося при 77 К, пропусклся постоянный ток  $I > I_c$  и измерялось напряжение на потенциальных контактах  $V$ . Затем прикладывалась нагрузка и определялось новое напряжение  $V_\sigma$ , соответствующее ВАХ нагруженного образца. При этом максимальные значения механических напряжений  $\sigma = P/S$  ( $P$  — нагрузка,  $S$  — сечение образца) составляли 50 МПа. Подобные измерения проводились при разных значениях  $V$ , т.е. при разных токах  $I$ .

Изучалось также влияние магнитного поля на эффект механических напряжений. Для измерения ВАХ в магнитном поле образцы вместе с передающими сжимающее усилие пуансонами из ультрафарфора помещались в катушку. Напряженность магнитного поля  $H$ , которое было параллельно нагрузке  $P$ , рассчитывалась по протекающему в катушке току.

## 2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1 на примере образца  $Y_{0.75}Er_{0.25}Ba_2Cu_3O_{7-y}$  демонстрируются изменения ВАХ под действием механических напряжений в магнитном поле различной напряженности. Как и в предыдущих работах [1-7], отчетливо наблюдается смещение ВАХ в сторону больших токов при нагружении образцов. Эффект смещения возрастает с увеличением приложенных напряжений, но уменьшается по абсолютной величине в присутствии магнитного поля.

Поскольку в магнитном поле происходит значительное уменьшение и критического тока, по-видимому, более целесообразно для характеристики эффекта напряжений использовать не абсолютное, а относительное изменение  $I_c$ . Значения коэффициента чувствительности критического тока к сжимающим напряжениям  $k_c = \Delta I_c / I_c \cdot \sigma$  в разных

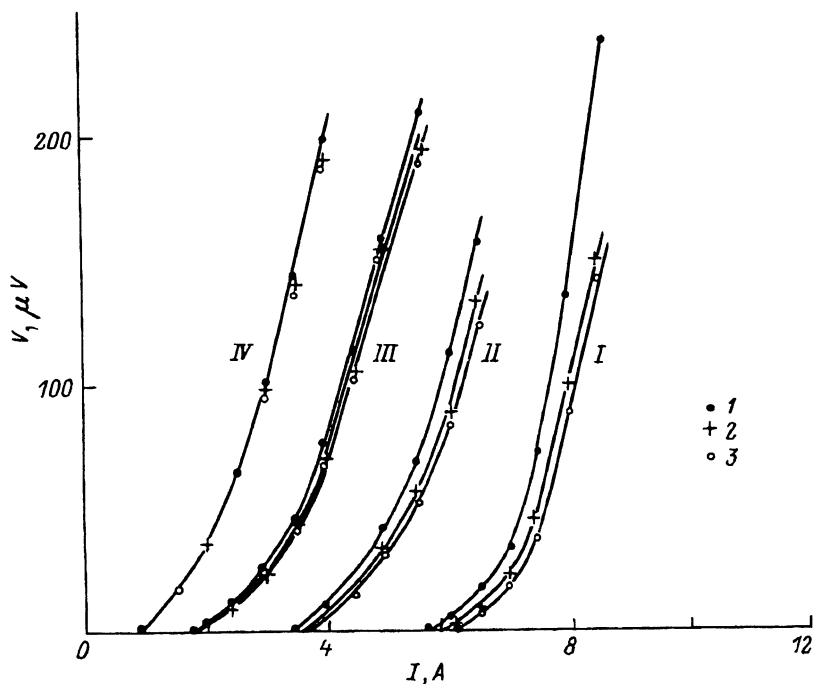


Рис. 1. Влияние сжимающей нагрузки на ВАХ керамики  $Y_{0.75}Er_{0.25}Ba_2Cu_3O_{7-y}$  в различных магнитных полях.

$H, Oe$ : I — 0, II — 12.5, III — 25, IV — 50.  $\sigma, MPa$ : 1 — 0, 2 — 12.5, 3 — 25.

магнитных полях  $H \parallel I \parallel P$  для образцов с разными значениями  $x$  представлены в таблице. Видно, что этот коэффициент для разных случаев находится примерно в пределах  $1-2 \text{ GPa}^{-1}$ , причем его величина в магнитном поле несколько возрастает. Похоже, что есть также тенденция к увеличению  $k_c$  и по мере возрастания  $x$ , однако для уверенности в такой закономерности необходимо проведение дополнительных экспериментов с большей статистикой. Следует еще отметить, что с увеличением  $\sigma$  коэффициент  $k_c$  уменьшается.

Значения коэффициента  $k_c$  для образцов  $Y_{1-x}Er_xBa_2Cu_3O_{7-y}$  в отсутствие и при наличии магнитного поля.  $\sigma = 25 \text{ MPa}$

$x$	$H, Oe$	$\Delta I_c / I_c \sigma, \text{ GPa}^{-1}$
0	0	0.9
	25	1.7
0.25	0	1.3
	12.5	1.8
	25	1.6
0.5	50	1.8
	0	1.9
1.0	50	2.4
	0	2.0

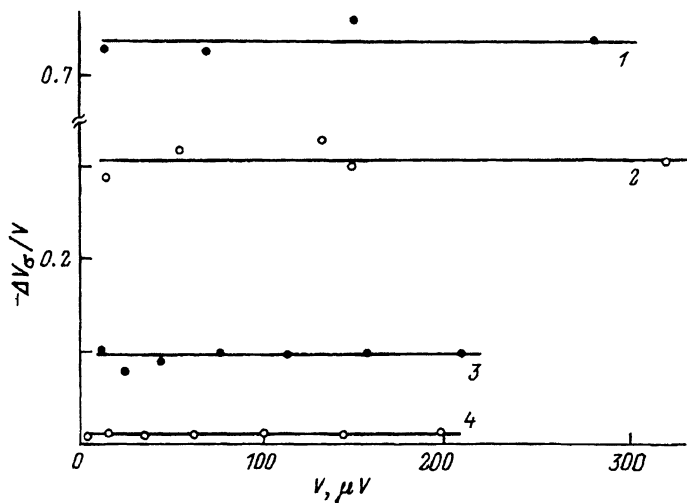


Рис. 2. Относительное изменение напряжений на ВАХ керамик  $Y_{1-x}Er_xBa_2Cu_3O_{7-y}$  при нагрузке  $\sigma = 25$  МПа в различных магнитных полях.  $H, Oe$ : 1, 2 — 0; 3 — 25; 4 — 50.  $x = 0.5$  (1), 1 (2), 0.25 (3, 4).

В качестве характеристики эффекта нагрузки на ВАХ может быть использовано изменение при этом напряжений  $\Delta V_\sigma = V_\sigma - V$  или его относительная величина  $\Delta V_\sigma/V = \Delta R/R$ . На рис. 2 показаны зависимости  $\Delta V_\sigma/V$  от  $V$  на ВАХ для некоторых керамик  $Y_{1-x}Er_xBa_2Cu_3O_{7-y}$  при нагрузке  $\sigma = 25$  МПа в различных магнитных полях. Прежде всего оказывается, что эффект нагрузки на относительное изменение напряжений вдоль начального участка ВАХ не зависит от самого уровня напряжений. Величина же эффекта для разных керамик может меняться, коррелируя с изменением коэффициента  $k_c$ , и зависит от напряженности магнитного поля.

На рис. 3 демонстрируется зависимость  $\Delta V_\sigma/V$  от величины  $H$  при  $V = \text{const}$  для керамики  $Y_{0.75}Er_{0.25}Ba_2Cu_3O_{7-y}$ . Видно, что  $\Delta V_\sigma/V$  при нагружении образца резко уменьшается с увеличением магнитного поля. Примечательно, что характер зависимости  $\Delta V_\sigma/V(H)$  практически совпадает с кривой  $I_c/I_{c0}(H)$ , также представленной на рис. 3.

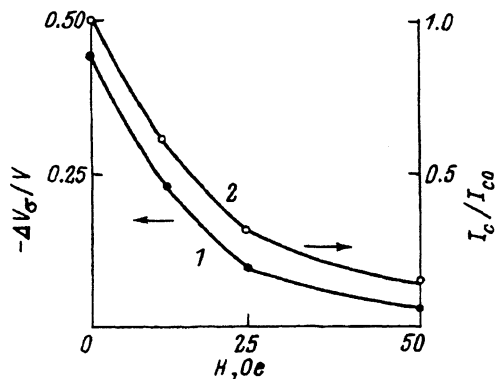


Рис. 3. Зависимость  $\Delta V_\sigma/V(H)$  при нагрузке  $\sigma = 25$  МПа и  $V = 100 \mu V$  (1) и относительное изменение критического тока  $I_c/I_{c0}$  в магнитном поле (2) для керамики  $Y_{0.75}Er_{0.25}Ba_2Cu_3O_{7-y}$ .

$I_{c0}$  — критический ток при  $H = 0$ .

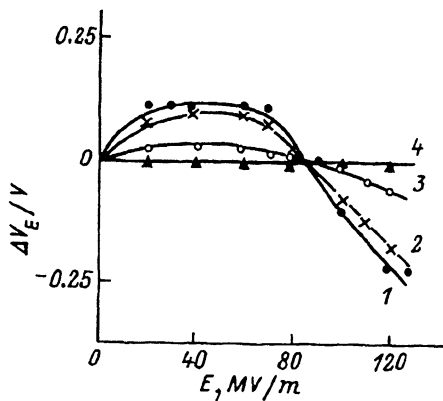


Рис. 4. Зависимости  $\Delta V_E/V$  от  $E$  для керамики  $Y_{0.5}Er_{0.5}Ba_2Cu_3O_{7-y}$  при отрицательном потенциале на электроде и  $V = 10$  (1), 40 (2), 220 (3) и  $400 \mu V$  (4).  $T = 77 K$ .

Помимо описанных выше экспериментов в работе проводилась также оценка эффекта электрического поля на ВАХ одной из керамик. Для этого к образцу прикладывалось не механическое усилие, а электрическое поле  $E$ , перпендикулярное транспортному току, и изучалась зависимость  $\Delta V_E/V = f(E)$  по методике [10]. Полученные результаты по указанной зависимости для керамики с  $x = 0.5$  представлены на рис. 4. Видно, что, как и в [10], для небольших значений  $V$  величина  $\Delta V_E/V$  вначале с увеличением  $E$  возрастает, а затем, проходя через максимум, уменьшается и становится отрицательной. При больших  $V \gtrsim 400 \mu V$  эффект поля на ВАХ отсутствует. Что касается максимальной величины эффекта, то он равен примерно 20%, тогда как обычно [10] он составляет около 50%, а при малых  $V$  может достигать 100%.

Таким образом, эксперименты показывают наличие заметного эффекта механических напряжений на критический ток и ВАХ специально приготовленных керамик  $Y_{1-x}Er_xBa_2Cu_3O_{7-y}$ . Нагружение образцов сжатием в случае  $I \parallel P$  приводит к увеличению критического тока и снижению сопротивления образца при  $I > I_c$ . В магнитном поле эффект напряжений на относительное изменение  $I_c$  несколько возрастает, а на относительное изменение  $R$  падает. Что касается эффекта электрического поля на ВАХ, то для данной керамики он оказывается очень слабым.

Остановимся теперь кратко на возможной физической природе наблюдавшихся эффектов. Известно, что критический ток и ВАХ керамических ВТСП определяются слабыми связями на границах зерен (гранул) [8,11]. Эти связи могут осуществляться путем джозефсоновского туннелирования S-N-S- и S-I-S-типа или иметь характер мостиков — микронных перемычек между зернами. В результате величина транспортного критического тока керамического образца определяется межгранульным критическим током. Следовательно, эффект механических напряжений на  $I_c$  и ВАХ скорее всего связан с воздействием нагрузки на межгранульные прослойки или упомянутые мостики. Например, при сжатии могут изменяться «толщина» и «состояние» границ, а также площадь «контактов» на них [2]. К сожалению, конкретный механизм (механизмы) воздействия напряжений на слабые связи

до сих пор не ясен, хотя имеются попытки дать качественное и полуквантитативное объяснение ряду экспериментальных результатов.

Так, в [8] рассмотрена модель, в которой ВТСП керамика представляет собой совокупность соприкасающихся друг с другом сверхпроводящих сфер, области контактов которых образуют слабые связи, определяющие  $I_c$  такой керамики. При этом показано, что в случае  $I \parallel H \parallel P$  при одноосном сжатии критический ток возрастает, причем для слабого магнитного поля эффекты этого поля и механических напряжений на критический ток аддитивны. Само изменение критического тока  $\Delta I_c$  под нагрузкой не зависит от величины магнитного поля и описывается соотношением

$$\Delta I_c = [I_c(H, \sigma) - I_c(H, 0)] \sim I_{c0} \sigma,$$

где  $I_{c0}$  — критический ток при  $H = 0$  и  $P = 0$ . Относительное же изменение критического тока

$$\frac{\Delta I_c}{I_c(H)} \sim \frac{I_{c0} \sigma}{I_c(H)}$$

с увеличением  $H$  возрастает, поскольку  $I_c(H)$  при этом уменьшается. В случае сильного магнитного поля, согласно [8], эффекты воздействия одноосного сжатия и указанного поля на критический ток керамики не аддитивны, а мультипликативны. При этом

$$\Delta I_c \sim \sigma / H^{3/2},$$

т.е.  $\Delta I_c$  с ростом магнитного поля уменьшается, а отношение

$$\frac{\Delta I_c}{I_c(H)} \sim \frac{\sigma}{I_c(H) H^{3/2}}$$

слабо меняется при увеличении  $H$ .

Полученные экспериментальные данные действительно показывают увеличение коэффициента  $k_c = \Delta I_c / I_c \sigma$  при включении слабого поля и примерное его постоянство при изменении  $H$  от 12.5 до 50 Ое (см. таблицу). Что же касается эффекта нагрузки на электрическое сопротивление образца при  $I > I_c$ , то в [8] он не рассматривался. На опыте величина  $\Delta V_\sigma / V$  при нагружении образца является постоянной вдоль ВАХ (рис. 2) и резко уменьшается в магнитном поле подобно величине критического тока (рис. 3). При дальнейшем теоретическом анализе эти результаты, видимо, могут привести к некоторым дополнительным заключениям о возможной природе изменений в слабых связях под воздействием механических напряжений.

Как уже отмечалось выше, на исследуемых образцах был проведен также эксперимент по влиянию электрического поля на критический ток и ВАХ. Как ни странно, эффект поля оказался очень слабым. Столь малый эффект ранее наблюдался нами лишь на иттриевой керамике, легированной серебром [10]. И хотя природа эффекта поля в керамиках до сих пор остается неясной, есть основания полагать, что

он также связан с наличием в этих объектах межгранульных слабых связей. Исходя из этого, казалось бы, следовало ожидать корреляции между эффектами механических напряжений и электрического поля. И для керамики, легированной серебром, это действительно так, а именно наблюдаются слабый эффект поля [10] и практически полное отсутствие эффекта нагрузки [3,6]. В настоящих экспериментах на керамике с  $x = 0.5$  такая корреляция отсутствует, и это еще раз подчеркивает сложную природу того и другого эффектов.

Таким образом, в настоящей работе получены новые качественные и количественные результаты по влиянию механических напряжений на критический транспортный ток и ВАХ керамик  $Y_{1-x}Er_xBa_2Cu_3O_{7-y}$ . В частности, установлено, что эффект напряжений (увеличение  $I_c$  и уменьшение сопротивления  $R$  при  $I > I_c$ ) наблюдается на всех керамиках, несколько возрастая с увеличением  $x$ . При этом относительное изменение критического тока  $\Delta I_c/I_c$  под нагрузкой в магнитном поле несколько возрастает, а величина  $\Delta R/R$  сильно уменьшается. Наблюдаемые эффекты связаны с воздействием внешних напряжений на межзеренные слабые связи, которые определяют  $I_c$  и ВАХ для изученных керамик.

#### Список литературы

- [1] Smirnov B.I., Orlova T.S., Shpeizman V.V. // J. Mech. Behavior of Materials. 1992. V. 3. N 4. P. 245-255.
- [2] Песчанская Н.Н., Смирнов Б.И., Шпейзман В.В. // ФТТ. 1989. Т. 31. № 8. С. 292-294.
- [3] Орлова Т.С., Смиров Б.И., Шпейзман В.В., Степанов Ю.П., Чернова С.П. // ФТТ. 1990. Т. 32. № 4. С. 1031-1037.
- [4] Орлова Т.С., Песчанская Н.Н., Марков Л.К., Смирнов Б.И., Шпейзман В.В., Энгерт И., Кауфманн Х.-Й., Шлефер У., Шнайдер Л. // ФТТ. 1991. Т. 33. № 1. С. 166-174.
- [5] Shpeizman V.V., Orlova T.S., Smirnov B.I., Markov L.K., Engert J., Kaufmann H.-J., Rudolph K., Matz W. // Cryst. Res. Technol. 1990. V. 25. N 7. P. 827-831.
- [6] Орлова Т.С., Марков Л.К., Смирнов Б.И., Шпейзман В.В., Степанов Ю.П. // ФТТ. 1991. Т. 33. № 12. С. 3595-3598.
- [7] Марков Л.К., Смирнов Б.И., Шпейзман В.В. // ФТТ. 1990. Т. 32. № 9. С. 2818.
- [8] Мейлихов Е.З. // СФХТ. 1991. Т. 4. № 12. С. 2297-2309.
- [9] Stepien-Damm J., Rogacki K., Morawska-Kowal T., Damm Z. // Supercond. Sci. Technol. 1992. V. 5. N 2. P. 346-348.
- [10] Смирнов Б.И., Криштопов С.В., Орлова Т.С. // ФТТ. 1992. Т. 34. № 8. С. 2482-2486.
- [11] Жуков А.А., Мошалков В.В. // СФХТ. 1991. Т. 4. № 5. С. 850-887.

Физико-технический институт  
им. А.Ф.Иоффе РАН  
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию  
18 марта 1994 г.